

## BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

EP04/8080  
20.07.2004PRIORITY  
DOCUMENTSUBMITTED OR TRANSMITTED IN  
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)Prioritätsbescheinigung über die Einreichung  
einer Patentanmeldung

Aktenzeichen: 103 33 770.9

Anmeldetag: 22. Juli 2003

Anmelder/Inhaber: Carl Zeiss Meditec AG, 07745 Jena/DE

Bezeichnung: Verfahren zur Materialbearbeitung mit Laserimpulsen  
großer spektraler Bandbreite und Vorrichtung zur  
Durchführung des Verfahrens

IPC: B 23 K, H 01 C, A 61 F



Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 28. Mai 2004  
 Deutsches Patent- und Markenamt  
 Der Präsident  
 Im Auftrag

Schmidt C.

**Verfahren zur Materialbearbeitung mit Laserimpulsen großer spektraler Bandbreite und Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens**

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Materialbearbeitung mit Laserimpulsen großer spektraler Bandbreite, insbesondere mit Femtosekunden- und Pikosekundenimpulsen sowie eine Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens.

Es ist eine Vielzahl von Verfahren bekannt, welche die Wechselwirkung elektromagnetischer Strahlung im infraroten, sichtbaren und ultravioletten Spektralbereich mit Materie zum Schmelzen, Verdampfen, Abtragen (Ablation) von Werkstoff US 4,494,226, zur Induzierung von Phasenübergängen US 6,329,270 oder zur Änderung anderer physikalischer oder chemischer Materialeigenschaften nutzen.

Wird das Wechselwirkungsgebiet von Laserlicht und Werkstück, beispielsweise durch optische Masken oder sukzessive Verschiebung des Laserfokus, auf der Oberfläche des Werkstücks räumlich geformt, so gelingt es, bei der Bearbeitung linien- und flächenhafte Strukturen zu erzeugen; und auch dreidimensionale Strukturen können durch schichtweise Abtragung sowie in transparenten Medien auch durch die Positionierung des Laserfokus in der Tiefe des Materials erzielt werden (DE 100 06 081 A1).

Für viele dieser Verfahren bedarf es hoher Leistungsdichten, die insbesondere durch Anwendung gepulster Laserstrahlungsquellen erreicht werden können. Bei der Verwendung von Laserimpulsen kurzer Dauer (einige Nanosekunden) wird eine besonders effiziente Bearbeitung erzielt (US 6,281,471). Störende, durch thermische Effekte verursachte Veränderungen des Werkstücks außerhalb der Wechselwirkungszone können bei noch kürzerer Impulsdauer weiter verringert werden (US 6,150,630). Dadurch ist es möglich, beispielsweise mittels Ablation, sehr feine Strukturen zu erzeugen, bei denen die Größe der Materialgebiete, in denen eine Wechselwirkung mit der Strahlung erfolgt, und jene, die keine wesentliche Veränderung gegenüber ihrem Ausgangszustand erfahren, nur durch die Größe des Laserfokus gegeben ist. Die theoretische Grenze für die minimalen Strukturgrößen ist dann durch die Beugungsbegrenzung und somit letztlich durch die Wellenlänge der verwendeten Laserstrahlung bestimmt. Insbesondere die Verwendung von Laserimpulsen mit Impulsdauern im Bereich von etwa 20 fs bis 1000 ps ermöglicht die direkte Mikro-Materialbearbeitung (F. Korte et. al.: "Sub-diffraction limited structuring of solid targets with femtosecond laser pulses", Optics Express 7, 2000, 41), die neben technischen Anwendungen

auch medizinische Anwendungen, insbesondere in der Mikrochirurgie, einschließt. Darüber hinaus finden Vorrichtungen zur Erzeugung spektral breitbandiger Laserimpulse als Ultrakurzpuls laser breite Anwendung in der Forschung.

In zwei experimentelle Arbeiten von Stoian et al. (R. Stoian et al.: "Laser ablation of dielectrics with temporally shaped femtosecond pulses", Appl. Phys. Lett. 80, 2002, 353; R. Stoian et al.: "Ultrafast laser material processing using dynamic temporal pulse shaping", RIKEN Review 50, 2003) wurde offenbart, wie mittels zeitlich geformter Laserimpulse der Strukturierungsprozess bei der Laserablation hinsichtlich der Reduktion des Restschadens optimiert werden kann. Zu diesem Zweck wurden mittels Phasenmodulation verschiedene Impulszüge erzeugt und die Vorteilhaftigkeit ihrer Verwendung gegenüber ungeformten Laserimpulsen des verwendeten Lasersystems beim ablativen Laserbohren ausgewählter Materialien unter Vakuumbedingungen experimentell nachgewiesen. Dazu wurden zum Vergleich ungeformte und geformte Laserimpulse jeweils auf die Oberfläche von a-SiO<sub>2</sub> und Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> gerichtet und das Bearbeitungsergebnis anschließend mit Hilfe eines Lichtmikroskops visuell analysiert.

Bei der Lasermaterialbearbeitung von Verbundwerkstoffen besteht die Möglichkeit, das Amplitudenspektrum der verwendeten Laserimpulse so zu wählen, dass eine materialselektive Bearbeitung möglich ist. Die Auswahl eines geeigneten Lasers unter dem Gesichtspunkt einer Anpassung der Laserwellenlänge an das zu bearbeitende Material ist eine bekannte Methode (beispielsweise US 5,948,214, US 5,948,214, US 4,399,345 und US 5,569,398). Allerdings können sich die physikalisch-technischen Eigenschaften des Bearbeitungsobjektes im Bearbeitungsvorgang, beispielsweise durch Materialerwärmung, ändern. Insbesondere Veränderungen der Absorptionscharakteristik von Verbundkomponenten schränken dabei die Materialselektivität im Bearbeitungsvorgang ein (US 6,281,471), da eine adäquate Veränderung der Laserwellenlänge bei den zur Materialbearbeitung verwendeten Lasern kaum möglich ist.

Es war deshalb ein Verfahren zu schaffen, mit dem möglichst aufwandgering, flexibel und universell anwendbar Bearbeitungswirkungen ermöglicht werden, die jeweils spezifisch hinsichtlich Bearbeitungsaufgabe und Prozessverlauf festgelegt und angepasst werden können.

Erfindungsgemäß werden für den Materialbearbeitungsprozess bzw. währenddessen ein oder mehrere spektrale Parameter der Laserimpulse, d. h. die spektrale Amplitude und/oder die spektrale Phase und/oder die spektrale Polarisation, gezielt verändert, um damit definierte bearbeitungsspezifische Effekte, wie beispielsweise die Erhöhung der Bearbeitungsgeschwindigkeit, die Verbesserung der Materialselektivität, oder die Verbesserung der Oberflächenstrukturierung, zu bewirken. Dabei ist es vorteilhaft, wenn zumindest ein spektraler Parameter in Abhängigkeit einer Messgröße aus dem Bearbeitungsprozess, vorzugsweise in einem Regelkreis, verändert wird. In den Unteransprüchen sind hierzu nähere Spezifikationen beispielhaft angeführt.

Auf diese Weise ist es einerseits möglich, die für den vorgesehenen Bearbeitungsvorgang und den beabsichtigten Effekt dieser Materialbearbeitung bestmögliche Einstellung der spektralen Laserimpuls-Parameter (beispielsweise auf Grund von Testergebnissen oder sonstigen Erfahrungen oder Berechnungen) vorzunehmen. Darüber hinaus können andererseits die besagten spektralen Laserimpuls-Parameter nicht nur definiert vorgewählt, sondern für den Materialbearbeitungsprozess und/oder während dessen Durchführung in Abhängigkeit einer Regelgröße unmittelbar aus dem Bearbeitungsvorgang in Hinsicht auf die beabsichtigte Bearbeitungswirkung verändert und angepasst werden. Insofern kann auch auf die Veränderung physikalisch-technischer Eigenschaften des Bearbeitungsobjektes und der Prozessbedingungen im Bearbeitungsvorgang reagiert werden, um die beziehungsweise Bearbeitungswirkung zu verbessern oder zumindest nicht zu beeinträchtigen. Beispielsweise kann im Fall von Materialerwärmungen, welche bei der Bearbeitung von Verbundwerkstoffen im Allgemeinen nicht ohne Auswirkung auf die Materialselektivität bleibt, die spektrale Amplitude der Laserimpulse in Abhängigkeit der Wechselwirkung der Laserimpulse mit den Verbundwerkstoffen als Messgröße dynamisch verändert werden. Diese Veränderungen können sowohl kontinuierlich oder in Intervallen unmittelbar im Bearbeitungsvorgang durchgeführt werden (Regelbetrieb), als auch mit Unterbrechung des Bearbeitungsvorganges und Neueinstellung der spektralen Parameter für dessen Weiterführung erfolgen.

Eigene Untersuchungen zur Mikrostrukturierung von optisch anisotropen Werkstoffen zeigen, dass durch eine gezielte Veränderung der Frequenzkomponenten eines spektral breitbandigen Laserimpulses der Wechselwirkungsprozess zwischen dem Laserimpuls und dem Bearbeitungsobjekt gesteuert werden kann. Insbesondere ermöglicht die gleichzeitige Regelung der spektralen Polarisation und der spektralen Phase bei der Bearbeitung anisotroper Werkstoffe die Kontrolle jenes Strukturierungsprozesses, der für die Erzeugung

von anisotropen Wellenleiterstrukturen genutzt wird, zumal bekannte experimentelle Ergebnisse (F. Korte et. al.: "Sub-diffraction limited structuring of solid targets with femtosecond laser pulses", Optics Express 7, 2000, 41) belegen, dass sogar bei der Laserbearbeitung optisch isotroper Materialien nicht nur eine lokale Brechzahländerung erfolgt, sondern in der Regel auch eine lokale Anisotropie induziert wird.

Möglichkeiten, die spektralen Parameter von spektral breitbandigen Laserimpulsen an sich zu verändern, sind hinreichend bekannt (US 4,655,547 oder Brixner and Gerber: Optics Letters 26, 2001, 557). Insbesondere Modulatoren auf der Grundlage mikro-elektro-mechanischer Systeme (MEMS) erscheinen für eine zukünftige industriellen Applikationen als aussichtsreich (Hacker et al.: „Micromirror SLM for femtosecond pulse shaping in the ultraviolet“, Appl. Phys. B 76, 2003, 711).

Die Erfindung soll nachstehend anhand zweier in der Zeichnung dargestellter Ausführungsbeispiele näher erläutert werden.

Es zeigen:

Fig. 1: Prinzipaufbau einer Vorrichtung zur Materialbearbeitung unter Formung der spektralen Laserimpuls-Parameter

Fig. 2: Prinzipaufbau einer Vorrichtung zur laserbasierten Unterbrechung elektrischer Leiterbahnen auf einem Mikrochip unter Veränderung der spektralen Amplitude der Laserimpulse.

In Fig. 1 ist der Prinzipaufbau einer Vorrichtung zur Materialbearbeitung unter Formung der spektralen Laserimpuls-Parameter dargestellt. Ein Kurzpuls laser 1 als Quelle breitbandiger Laserimpulse 1 steht über einen Impulsformer 2 zur Formung der spektralen Parameter der Laserimpulse mit einer Bearbeitungseinheit 3 zur Materialbearbeitung eines nicht dargestellten Bearbeitungsobjektes in Verbindung. Die Impulse des Kurzpuls lasers 1 werden somit in ihrer spektralen Amplitude und/oder der spektralen Phase und/oder der spektralen Polarisation geformt und rufen in der Bearbeitungseinheit 3 bei ihrem Auftreffen auf das Bearbeitungsobjekt eine physikalisch-technische Wechselwirkung mit dessen Material hervor. Dabei können die geformten Laserimpulse (wie gestrichelt dargestellt) ggf. auch über einen optischen Verstärker 4 zur Bearbeitungseinheit 3 gelangen.

Mit Veränderung eines oder mehrerer spektralen Parameter der Laserimpulse durch den Impulsformer 2 kann die Wechselwirkung der Laserimpulse mit dem Material des Bearbeitungsobjektes zum Erreichen definierter bearbeitungsspezifischer Effekte, beispielsweise in Hinsicht auf Bearbeitungsgeschwindigkeit, Materialselektivität oder Oberflächenstrukturierung, für den Bearbeitungsprozess oder auch im Verlauf desselben beeinflusst werden.

Dabei ist es vorteilhaft, wenn die spektrale Parameteränderung in Abhängigkeit einer als Regelgröße dienenden Messgröße der Materialbearbeitung verändert wird. Zu diesem Zweck ist an die Bearbeitungseinheit 3 mit dem zu bearbeitenden Objekt vorzugsweise eine Messeinrichtung 5 gekoppelt, die über eine Steuereinheit 6 mit dem Impulsformer 2 in Verbindung steht. Die Messeinrichtung 5 misst beispielsweise die Ablationsrate, die Oberflächenrauhigkeit oder die Material- bzw. Umgebungstemperatur des Bearbeitungsobjektes und liefert über die Steuereinheit 6 eine messgrößenabhängige Regelgröße zur Veränderung der spektralen Amplitude und/oder der spektralen Phase und/oder der spektralen Polarisation der Impulse des Kurzpulsasers 1.

In Fig. 2 ist der Prinzipaufbau einer speziellen Vorrichtung zur laserbasierten Unterbrechung elektrischer Leiterbahnen auf einem Mikrochip (link blow) dargestellt. Eine solche Aufgabe zur Materialbearbeitung besteht insbesondere bei Konditionierung von Speicherchips. Dabei kann das erfindungsgemäße Verfahren vorteilhaft eingesetzt werden, um die erzielte Materialselektivität zur Vermeidung von Schäden am Substrat des Mikrochips zu nutzen, welche sonst durch Ungenauigkeit bei der räumlichen Überlagerung des Laserlichts mit den zu bearbeitenden Leiterbahnen entstehen (vgl. auch US 6,281,471). Da es bei der Materialbearbeitung auch zur Temperaturänderung des Bearbeitungsobjektes kommt, wodurch sich die Absorptionsspektren der einzelnen Materialkomponenten verschieben, ist die Wirkung des erfindungsgemäßen Verfahrens besonders vorteilhaft, weil ansonsten mit Verschiebung der besagten Absorptionsspektren der Verbundmaterialien eine Beeinträchtigung der Materialselektivität gegeben wäre. Dies könnte ebenfalls Bearbeitungsfehler und Schäden am Bearbeitungsobjekt zur Folge haben.

Die Vorrichtung enthält einen Femtosekundenlaser 7, der über eine Laserverstärkerstufe 8 mit einem amplitudenmodulierenden Pulsformer 9 in Verbindung steht, dessen Steuereingang zur Amplitudenmodulierung an den Ausgang einer Steuereinheit 10 angeschlossen ist. Die Laserimpulse des Femtosekundenlasers 7 gelangen nach Verstärkung und nach Modulierung ihrer spektralen Amplitude auf ein achromatisches Objektiv 11,

welches den Laserstrahl auf einen Wechselwirkungsbereich 12 mit einem Bearbeitungsobjekt 13 lenkt. Das Bearbeitungsobjekt 13 ist auf einem Koordinatentisch 14 angeordnet, der eine Positionierung des Bearbeitungsobjektes 13 in drei Raumrichtungen erlaubt. Der amplitudenmodulierende Pulsformer 9 kann beispielsweise durch eine optische Anordnung gemäß US 4,655,547 realisiert werden, welche eine räumliche Separation der spektralen Komponenten des Laserstrahls mittels eines Beugungsgitters und eine nachfolgende Abbildung des Spektrums in eine Fourierebene mittels einer Linse beinhaltet. Eine in dieser Fourierebene angeordnete polarisationsrotierende, streifenförmige Flüssigkristallmatrix (twisted nematic liquid crystal matrix) dient als räumlicher Lichtmodulator und bewirkt eine Veränderung des Polarisationszustandes der die einzelnen Streifen durchsetzenden spektralen Komponenten. Ein nachfolgender Polarisator (Analysator) dient in der besagten Patentschrift zur Übertragung der auf diese Weise erzielten Änderung des Polarisationszustands der einzelnen spektralen Komponenten in die gewünschte spektrale Amplitudenmodulation. Eine weitere Linse und ein weiteres dispersives Element mit den gleichen Parametern der entsprechenden Eingangskomponenten bewirken eine Rücktransformation des räumlich separierten Spektrums in den Laserstrahl (Kollimation).

Bei geeigneter Wahl der Parameter für die Impulsformung lässt sich eine Materialselektivität durch die Anpassung der spektralen Amplitude der Laserimpulse an das Absorptionspektrum der zu bearbeitenden Materialkomponente erzielen, um benachbarte Zonen anderen Materials bei der Laserbearbeitung nicht zu schädigen. Darüber hinaus kann auch auf Temperaturveränderungen reagiert werden, die infolge der Materialbearbeitung entstehen und die Absorptionsspektren der Verbundmaterialien verschieben. In diesem Fall könnte (vgl. Fig. 1) am Bearbeitungsobjekt 13 ein Messfühler zur Temperatur erfassung angeordnet sein (aus Übersichtsgründen nicht in Fig. 2 dargestellt), der mit der Steuereinheit 10 in Verbindung steht. In diesem Fall würde der Impulsformer mit einer temperaturabhängigen Steuerung während der Lasermaterialbearbeitung eine dynamische Anpassung der spektralen Amplitude der Laserimpulse an die Absorptionscharakteristik des zu ablatierenden Materials erlauben, so dass Temperaturveränderungen im Bearbeitungsprozess nicht die Materialselektivität beeinträchtigen.

Die Realisierung der Erfindung ist nicht an die angegebenen Ausführungsbeispiele gebunden, fachmännische Weiterentwicklungen verlassen nicht den durch die Ansprüche definierten Schutzbereich.

**Aufstellung der verwendeten Bezugszeichen**

|       |   |                                    |
|-------|---|------------------------------------|
| 1     | - | Kurzpuls laser                     |
| 2     | - | Impulsformer                       |
| 3     | - | Bearbeitungseinheit                |
| 4     | - | optischer Verstärker               |
| 5     | - | Messeinrichtung                    |
| 6, 10 | - | Steuereinheit                      |
| 7     | - | Femtosekundenlaser                 |
| 8     | - | Laserverstärkerstufe               |
| 9     | - | amplitudenmodulierender Pulsformer |
| 11    | - | achromatisches Objektiv            |
| 12    | - | Wechselwirkungsbereich             |
| 13    | - | Bearbeitungsobjekt                 |
| 14    | - | Koordinatentisch                   |

### Patentansprüche

1. Verfahren zur Materialbearbeitung mit Laserimpulsen großer spektraler Bandbreite, bei welchem die Laserimpulse auf ein Bearbeitungsobjekt treffen oder in ein Bearbeitungsobjekt eindringen und auf oder in dem Bearbeitungsobjekt eine physikalische oder chemische Veränderung des Materials hervorrufen, dadurch gekennzeichnet, dass zum Erreichen definierter bearbeitungsspezifischer Effekte, wie beispielsweise die Erhöhung der Bearbeitungsgeschwindigkeit, die Verbesserung der Materialselektivität, die Verbesserung der Oberflächenstrukturierung, oder das Erzielen eines optischen Durchbruchs ein oder mehrere spektrale Parameter der Laserimpulse vor und/oder während des Bearbeitungsprozesses gezielt verändert werden.
2. Verfahren gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass als spektraler Parameter die spektrale Amplitude der Laserimpulse verändert wird.
3. Verfahren gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass als spektraler Parameter die spektrale Phase der Laserimpulse verändert wird.
4. Verfahren gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass als spektraler Parameter die spektrale Polarisation der Laserimpulse verändert wird.
5. Verfahren gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass zumindest ein spektraler Parameter in Abhängigkeit einer Messgröße aus dem Bearbeitungsprozess vorzugsweise dynamisch verändert wird.
6. Verfahren gemäß Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass als Messgröße die Abtragsrate der Materialbearbeitung dient.
7. Verfahren gemäß Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass als Messgröße die Oberflächenrauhigkeit dient.

8. Verfahren gemäß Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass insbesondere bei der Erzeugung oder Bearbeitung eines optischen Wellenleiters die Transmission des Bearbeitungsobjektes als Messgröße verwendet wird.
9. Verfahren gemäß Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass insbesondere bei der Erzeugung oder Bearbeitung eines optischen Wellenleiters die Reflexion elektromagnetischer Wellen als Messgröße verwendet wird.
10. Verfahren gemäß Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass der vom Bearbeitungsbereich reflektierte Anteil des Laserlichts als Messgröße dient.
11. Verfahren gemäß Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass insbesondere bei der Herstellung oder Bearbeitung eines mikromechanischen Bauelements mindestens eine seiner Resonanzfrequenzen als Messgröße herangezogen wird.
12. Verfahren gemäß Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass insbesondere bei der Herstellung oder Bearbeitung eines mikromechanischen Bauelements eine Resonanzamplitude bei einer definierten Schwingungsfrequenz als Messgröße dient.
13. Verfahren gemäß Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Hydrophobizität bzw. die Hydrophilizität der Bearbeitungsoberfläche als Messgröße ausgewertet wird.
14. Verfahren gemäß Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Anisotropie des bearbeiteten Materials als Messgröße ausgewertet wird.
15. Verfahren gemäß Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass bei der Bearbeitung von Verbundwerkstoffen die Materialselektivität die Wechselwirkung der Laserimpulse mit den Verbundwerkstoffen als Messgröße verwendet wird.
16. Verfahren gemäß Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass bei der Bearbeitung von mikroelektronischen Bauelementen mindestens eine ihrer elektrischen Eigenschaften, wie Leitfähigkeit oder Kapazität, als Messgröße verwendet wird.

17. Verfahren gemäß Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass bei der Bearbeitung menschlichen Gewebes, insbesondere menschlichen Augengewebes, mindestens ein Plasmaparameter, wie der Energie-Schwellwert für den optischen Durchbruch, das Streulicht oder das Plasmaspektrum, als Messgröße verwendet wird.
18. Verfahren gemäß Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, das bei der Zwei-Photonen-Polymerisation photosensitiver Materialien, insbesondere eines flüssigen Resins, die Quanteneffizienz des Polymerisationsprozesses, optische, oder mechanische Eigenschaften des polymerisierten Materials als Messgröße verwendet werden.
19. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die spektralen Parameter der Laserimpulse zunächst in ihrer Wirkung auf den vorgesehenen Bearbeitungsvorgang getestet werden und dass anschließend die in Hinsicht auf die abgezielte Bearbeitungswirkung ausgewählten spektralen Parameter als Ausgangsgrößen für den Materialbearbeitungsprozess eingestellt werden.
20. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die aus Erfahrungen oder Berechnungen bekannten spektralen Parameter der Laserimpulse als Ausgangsgrößen für den Bearbeitungsprozess eingestellt werden.
21. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass ein Laser (1) zur Erzeugung von Laserimpulsen großer spektraler Bandbreite über einen Impulsformer (2) zur Einstellung bzw. Veränderung der spektralen Amplitude und/oder der spektralen Phase und/oder der spektralen Polarisation der Laserimpulse mit einer Bearbeitungseinheit (3, 11) für die Laserimpulsbehandlung eines Bearbeitungsobjektes (13) in Verbindung steht.
22. Vorrichtung nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, dass dem Impulsformer (2) mindestens eine Verstärkerstufe (4, 8) zur Verstärkung der Laserimpulse vor- und/oder nachgeschaltet ist.
23. Vorrichtung nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, dass eine Messeinrichtung (5) zur Überwachung des Bearbeitungsprozesses vorgesehen ist, welche über eine Steuereinheit (6, 10) mit dem Impulsformer (2) in Verbindung steht.

24. Vorrichtung nach Anspruch 23, dadurch gekennzeichnet, dass die Messeinrichtung (5) mindestens eine Messeinrichtung zur Messung der optischen Materialeigenschaften, wie Streuung, Brechzahl oder Plasma-Emissionsspektrum hat.
25. Vorrichtung nach Anspruch 23, dadurch gekennzeichnet, dass die Messeinrichtung (5) mindestens einen Messwertaufnehmer zur Messung der Temperatur der Materialbearbeitung besitzt.
26. Vorrichtung nach Anspruch 23, dadurch gekennzeichnet, dass die Messeinrichtung (5) mindestens einen Messwertaufnehmer zur Messung der Oberflächenrauhigkeit des Bearbeitungsobjektes (14) besitzt.
27. Vorrichtung nach Anspruch 23, dadurch gekennzeichnet, dass die Messeinrichtung (5) mindestens einen optischen Sensor aufweist.
28. Vorrichtung nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, dass sie zur Bearbeitung menschlichen Augengewebes geeignet ist.
29. Vorrichtung nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, dass sie einen spektralen Phasenmodulator beinhaltet, der auf der Verwendung eines mikro-elektro-mechanischen Systems (MEMS) basiert.

**Zusammenfassung**

**1. Verfahren zur Materialbearbeitung mit Laserimpulsen großer spektraler Bandbreite und Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens.**

**2.1. Es war ein Verfahren zu schaffen, mit dem möglichst aufwandgering, flexibel und universell anwendbar Bearbeitungswirkungen ermöglicht werden, die jeweils spezifisch hinsichtlich Bearbeitungsaufgabe und Prozessverlauf festgelegt und angepasst werden können.**

**2.2. Erfindungsgemäß werden für den Materialbearbeitungsprozess bzw. währenddessen ein oder mehrere spektrale Parameter der Laserimpulse, d. h. deren spektrale Amplitude und/oder die spektrale Phase und/oder die spektrale Polarisation, gezielt verändert, vorzugsweise in Abhängigkeit einer Messgröße aus dem Bearbeitungsprozess.**

**2.3. Die Erfindung wird verwendet zur Materialbearbeitung mit Laserimpulsen großer spektraler Bandbreite, insbesondere mit Femtosekunden- und Pikosekundenimpulsen.**

**3. Fig. 1**

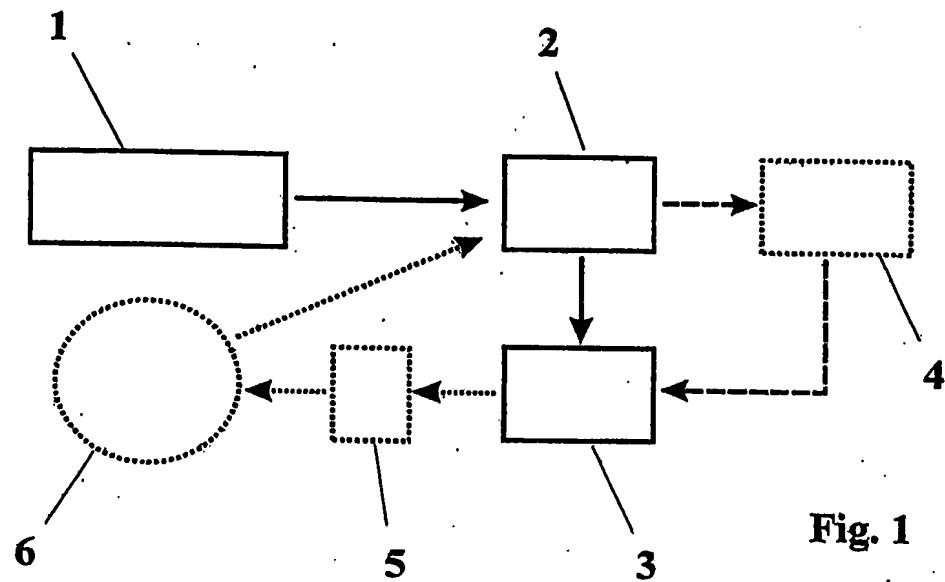


Fig. 1

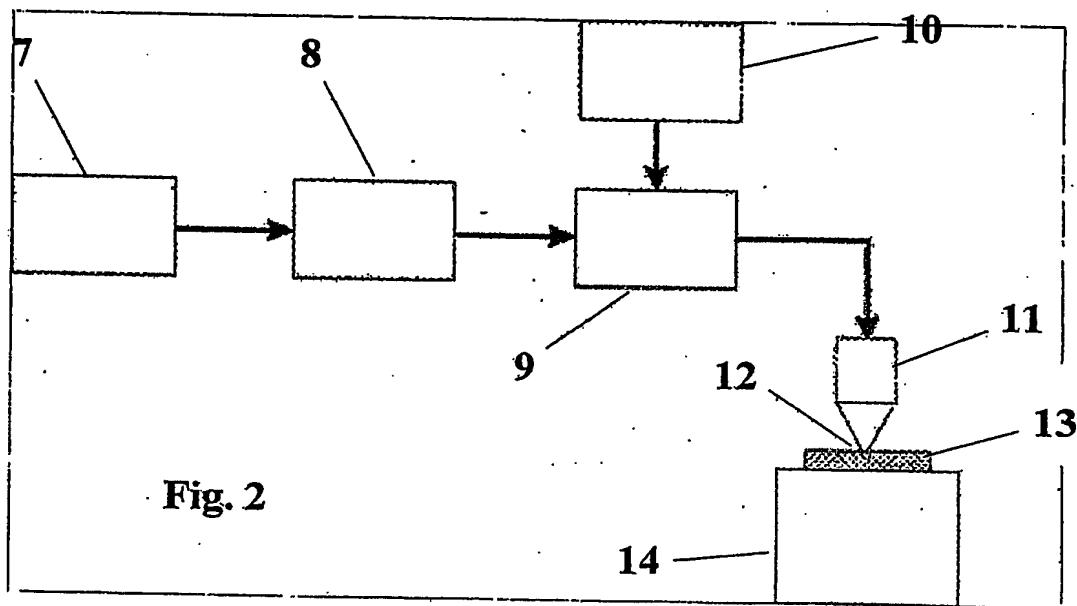


Fig. 2

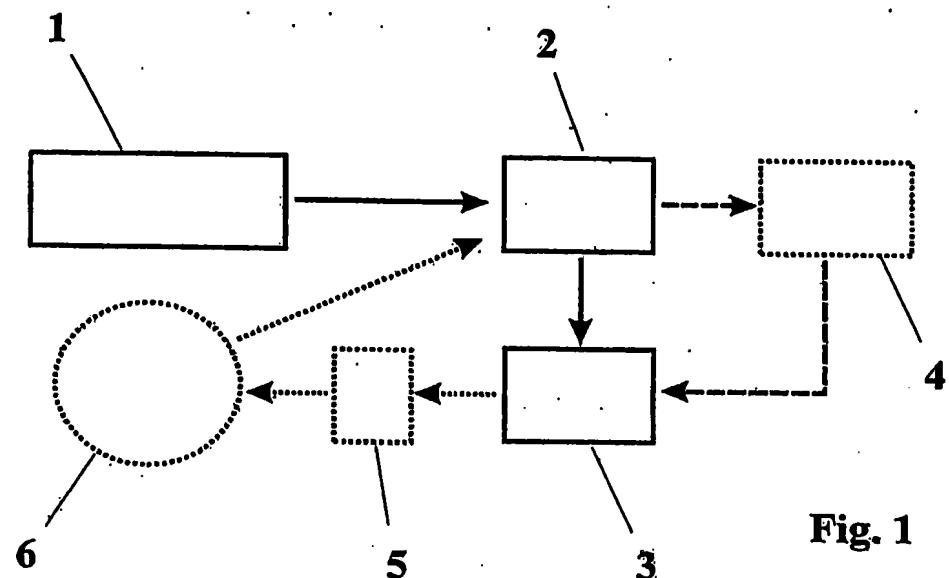


Fig. 1

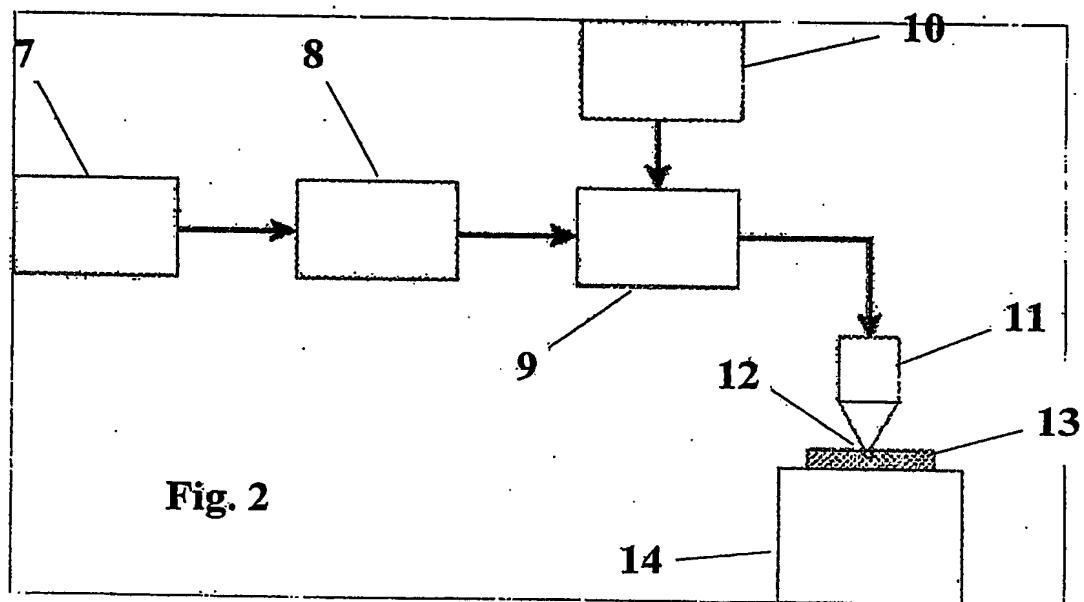


Fig. 2